

ния углерода, однако к концу процесса скорость на текущую массу существенно возрастает. Полученные величины сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Полученные результаты по скорости конверсии		
Топливо	при $X = 0,5$	при $X = 0,95$
Торф	0,0171	0,1251
Бурый уголь	0,0127	0,1347
Каменный уголь	0,0033	0,0021
Антрацит	0,0055	0,0456

Конверсия коксового остатка торфа и антрацита и бурого угля проходит по закону модели объемного реагирования, однако бурый уголь во второй половине процесса стремится к модели сжимающегося ядра, в то время как весь процесс конверсии каменного угля стремится к модели сжимающегося ядра.

Список использованных источников

1. Древесноугольная металлургия [Электронный ресурс] URL: <http://metalspace.ru/production-science/economy/991-drevesnougolnaya-metallurgiya.html>.
2. Что такое металлургический уголь [Электронный ресурс] URL: <http://stalevarim.ru/pub/chto-takoe-metallurgicheskiy-ugol-i-chem-on-otlichaetsya-ot-drugi>.
3. Gomez A. et al. A comprehensive experimental procedure for CO₂ coal gasification: Is there really a maximum reaction rate // Applied Energy. 2010. No. 124. pp. 73-81.
4. Miura K., Silveston P. L. Analysis of Gas-Solid Reactions by Use of a Temperature Programmed Reaction Technique // Energy & Fuels. 1989. Vol. 3. pp. 243-249.
5. Ishida M., Wen C. Y. Comparison of Kinetic and Diffusional Models for Solid-Gas Reactions // AIChE J. 1968. Vol. 14. pp. 311-317.
6. Хасанов Р.Р., Данилова Д.А., Худякова Г.И. Особенности выхода летучих твердых топлив // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Материалы всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (Екатеринбург, 2016 г.).

УДК 662.76

Д. С. Худяков, П. С. Филиппов, С. И. Гордеев, Е. И. Левин

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УЗЛА УДАЛЕНИЯ CO₂ НА ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ПГУ–ВЦГ

Аннотация

В данной работе рассматривается влияние наличия *shift*-реактора и узла удаления CO₂ (CCS) из синтез-газа (технология *pre-combustion*) на термический КПД перспективной парогазовой установки с внутрицикловой газификацией твёрдого топлива (ПГУ–ВЦГ). Проведен анализ литературных источников по влиянию CCS на термический КПД трёх кислородных ПГУ–ВЦГ. Представлено расчетное влияние степени интеграции CCS в схему демонстрационной ПГУ–ВЦГ на состав сжигаемого газового топлива. Приводится принцип работы *shift*-реактора. Рассматриваются различные типы катализаторов, используемых в *shift*-реакторе. Проанализировано влияние CCS на экономические и экологические показатели ПГУ–ВЦГ. Проведен анализ схем перспективной воздушной ПГУ–ВЦГ с узлом CCS и без не-

20. Анализ проведен на основе сравнения расчетных результатов, полученных в программном пакете Thermoflow (лицензионное соглашение датировано 20 ноября 2014 года, лицензия № 2361, владельцем лицензии является Уральский федеральный университет).

Abstract

Keywords: syngas, IGCC, water-shift reaction synthesis gas with a high concentration of hydrogen, CO₂ removal.

В shift-реакторе оксид углерода, в присутствии катализатора, вступает в обратимую экзотермическую реакцию с водяным паром, образуя при этом диоксид углерода и водород:

На рис. 1 представлена принципиальная схема ПГУ-ВЦГ Osaki CoolGen с узлом CCS.

Рис. 1. Принципиальная схема ПГУ–ВЦГ Osaki CoolGen по данным [1]:

В shift-реакторе реакция протекает при температурах 204.5–482 °С и для её поддержания используют специальные катализаторы на основе железа, хрома, меди, алюминия, цинка

[2]. В пилотном shift-реакторе коммерческой ПГУ–ВЦГ Buggenum используют катализаторы типа SK-201-2 на основе железа/хрома, разработанный фирмой Haldor Topsoe [3]. Если сравнивать использование катализаторов из драгоценных металлов и простых металлов в равном объеме, то стоимость катализаторов на основе драгоценных металлов будет в ~14 раз выше, но срок службы больше чем у катализаторов из простых металлов [2].

Преимущества наличия shift-реактора в схеме ПГУ–ВЦГ: возможность продажи NH_3 , CO_2 , H_2SO_4 сторонним потребителям; меньшие выбросы CO и NO_x [4].

В таблице 1 представлено влияние использования CCS на экономические показатели кислородных ПГУ–ВЦГ.

Таблица 1

Влияние CCS на эффективность кислородных ПГУ–ВЦГ [5]

ПГУ–ВЦГ	GE Energy		E-Gas		Shell	
Удаление CO_2	Нет	Да	Нет	Да	Нет	Да
Мощность (брутто), МВт	770	745	742	694	748	693
Затраты на собственные нужды, МВт						
Базовая загрузка станции	23	23	25	26	21	19
Блок разделения воздуха	103	121	91	109	90	113
Очистка газа/удаление CO_2	4	18	3	15	1	16
Сжатие CO_2	–	27	–	26	–	28
Итого затраты на собственные нужды, МВт	130	189	119	176	112	176
Мощность (нетто), МВт	640	556	623	518	636	517
КПД (нетто), %	38.2	32.5	39.3	31.7	41.1	32.0
Изменение эффективности	–	5,7	–	7,6	–	9,1

Анализ таблицы 1 показал, что при использовании узла CCS в случае GE Energy мощность ПГУ–ВЦГ падает на 3.25 %, эффективность установки (КПД) падает на 5.7 %. Мощность установки E-Gas падает на 6.47 %, эффективность установки (КПД) падает на 7.6 %. Мощность установки Shell падает на 7.35 %, эффективность установки падает на 9.1 %.

Таким образом из таблицы 1 видно, что использование узла CCS в схемах кислородных ПГУ–ВЦГ снижает КПД установки на ~5–9 % [5].

В таблице 2 представлены расчетные параметры перспективной воздушной ПГУ–ВЦГ без узла CCS и с горячей газоочисткой, описанный в [6].

Таблица 2

Расчетные параметры перспективной воздушной ПГУ–ВЦГ [6]

Параметр		Единица измерения	Значение
Температура газоочистки		°C	500
Температура циклового воздуха		°C	500
Температура паровоздушного дутья		°C	500
Теплота сгорания синтез-газа		МДж/м ³	5,2
Химический КПД		%	80,2
Расход топливного газа		кг/с	148,6
Расход циклового воздуха в КС		кг/с	488,9
Расход рабочего тела		кг/с	725
Температура на входе в газовую турбину		°C	1400
Расход топлива	на газогенератор	кг/с	39,8
	на воздушный котел №1	кг/с	0
	на воздушный котел №2	кг/с	0
	суммарный	кг/с	39,8
Мощность ГТУ		МВт	273
КПД ГТУ		%	33,08

Параметр		Единица измерения	Значение
Расход пара	из газоохладителя	кг/с	80,6
	из котла-утилизатора	кг/с	59,4
	суммарный	кг/с	140
Мощность ПТУ		МВт	210
КПГУ		–	0,565
Мощность ПГУ		МВт	483
КПД ПГУ-ВЦГ (брутто)		%	53,8
КПД ПГУ-ВЦГ (нетто)		%	52,09

Расчеты, проведенные в программном пакете ThermoFlow, показали, что добавление shift-реактора в схему перспективной воздушной ПГУ–ВЦГ [6] (при неизменной компоновке основного и вспомогательного оборудования) снижает КПД установки на 5 % (КПД ПГУ–ВЦГ (нетто) составит 47 %). Комбинация shift-реактора с узлом CCS в схеме перспективной воздушной ПГУ–ВЦГ [6] приведет к дополнительному снижению КПД установки на 7 % (КПД ПГУ–ВЦГ (нетто) составит 40 %).

Список использованных источников

1. Dodo S., Karishuku M. et al., MHI Tech. Review, 52, 2, 24-31 (2015).
2. J. R. Ladebeck and J. P. Wagner, Handbook of Fuel Cells – Fundamentals, Technology and Applications, 3, 2, 190-201, 2003.
3. Damen K., Gnutek R., Kaptein J. et al., Energy Procedia, 4, 1214-1221, 2011.
4. Nelson M., Rush R. et al., Kemper County IGCC Project. Preliminary Public Design Report, US Department of Energy, 2012.
5. Everitt E. Integrated Gasification Combined Cycle, Wyoming Coal Gasification Symposium Casper, Wyoming, 2007.
6. Абаимов Н.А., Амарская И.Б. [и др.]; под ред. Рыжкова А.Ф. Анализ технологических решений для ПГУ с внутрицикловой газификацией. – Екатеринбург: УрФУ, 2017.

УДК 66.041.51

А. А. Чапурина, Е. В. Киселев

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ТЕХНИЧЕСКОЕ ПЕРЕВООРУЖЕНИЕ КОЛЬЦЕВОЙ ПЕЧИ

Аннотация

В работе рассмотрены конструкция и тепловая работа кольцевой печи для нагрева трубных заготовок перед прокаткой. Произведен расчет нагрева металла и составлен тепловой баланс действующей печи. По полученным данным выявлены основные недостатки конструкции и тепловой работы. Предложены мероприятия по техническому перевооружению печи с целью снижения расхода топлива и повышения производительности: замена кирпичной футеровки на волокнистую, применение скоростных горелок, использования не водоохлаждаемых перегородок. Для более полной оценки положительного влияния предложенных мероприятий был составлен новый тепловой баланс. Проанализирована работа печи после модернизации, определены новые показатели тепловой работы. При реализации предложенного технического перевооружения ожидается существенный экономический эффект, улучшение качества нагрева металла, при сокращении расхода топлива и увеличении производительности агрегата.